

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРОСТЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЯДРА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СЕПАРАТОРОВ С БЕГУЩИМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Назаров С.Л., Абдуллаев Ж.О., Батенев А.О.

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,
г. Екатеринбург, Россия, E-mail: nazarovsl.ekb@yandex.ru

Аннотация — В статье рассмотрены особенности электромагнитных процессов в электродинамических сепараторах с бегущим магнитным полем. Описаны различные подходы к моделированию этих процессов. Представлены сопоставления экспериментальных и расчетных данных обсуждаемых моделей. Приведены технические характеристики экспериментальной установки.

Ключевые слова — электродинамический сепаратор, линейная индукционная машина с коротким вторичным элементом.

ВВЕДЕНИЕ

Электродинамические сепараторы представляют собой электротехнологические устройства, предназначенные для извлечения кусков (частиц) немагнитных металлов из сыпучих смесей с неметаллами, или сортировки лома различных металлов, например, меди и алюминия, и т.д.

По своему принципу действия электродинамические сепараторы относятся к классу гетерополярных индукционных машин, в которых электрохимическое преобразование энергии обусловлено силовым взаимодействием движущегося поля индуктора и индуцированными им токами якоря (проводящей извлекаемой частице).

Особенностью электродинамических сепараторов является крайне короткий (меньший пространственного периода магнитного поля индуктора - $2\tau_1$) вторичный элемент (ВЭ) [1]. Эта конструктивная особенность электродинамического сепаратора, переводит его в особый вид индукционных гетерополярных машин по следующему признаку: неравенству величин пространственных периодов движущихся волн магнитного поля и плотности токов индуктора - $2\tau_1$ и ВЭ - $2\tau_2 = b$, т.е.

$$\tau_1 \neq \tau_2 \quad (1)$$

Наличие продольных границ ВЭ, находящегося в зазоре линейной индукционной машины (ЛИМ), обуславливает

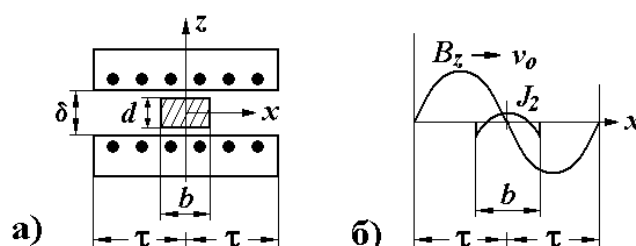


Рис. 1. Особенности ЛИМ сепаратора: а) – конструкции; б) – распределений электромагнитных величин

возникновение в нем магнитного поверхностного эффекта. Отметим, что для классических индукционных машин (вращающихся и линейных) с массивным ВЭ проявление магнитного поверхностного эффекта возможно только вдоль двух осей машины: поперечной - y (поперечный краевой эффект) и (или) нормальной - z (толщинный эффект в ВЭ). Поскольку электрохимическое преобразование энергии в электрических машинах определяется преимущественно характером продольных распределений индукции $B_z(x)$ и вторичной плотности тока $J_{2y}(x)$, то, как показано в [1], магнитный поверхностный эффект оказывает непосредственное влияние на характеристики таких машин.

Помимо поверхностного эффекта в продольном направлении, для электродинамических сепараторов с бегущим магнитным полем (с линейным индуктором) весьма значимы следующие:

- первичный продольный краевой эффект, определяющий неравномерное распределение магнитного поля вдоль магнитопровода с конечными размерами и конкретным типом обмоток (числом полюсов и схемой соединения фаз);

- толщинный эффект, состоящий в изменении магнитного поля по высоте воздушного зазора, характер которого связан с видом магнитной системы сепаратора (открытой, с обратным магнитопроводом, двусторонней).

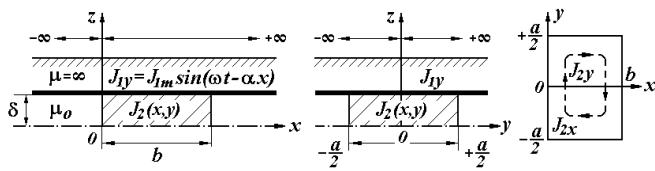


Рис. 2.

Полный учет всех этих явлений возможен только в трехмерной постановке, крайне затратной и не обладающей наглядностью.

Ранжирование различных эффектов по степени значимости позволяет использовать менее сложные одномерные и двумерные аналитические методы.

Так, в [2] представлена двумерная аналитическая модель ЛИМ (рис. 2) с коротким ВЭ и бесконечно длинным индуктором, описывающая явления вытеснения вторичных токов в продольном - x и поперечном направлениях - y . Первичный продольный краевой эффект в этой модели исключен, толщинный эффект учитывается косвенным образом, изменением величины немагнитного зазора [60].

Выражение для усилия в этой модели имеет следующий вид

$$F_x = \frac{\mu_0 ab \delta}{4\alpha} J_{lm}^2 \operatorname{Re} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} k_{0n} [1 - k_{1n} + k_{2n}] \right\}, \quad (2)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость воздушного зазора;

$$\alpha = \pi/\tau;$$

J_{lm} – объемная плотность тока индуктора;

k_{0n}, k_{1n}, k_{2n} – коэффициенты, определенные в [2] (по причине громоздкости здесь не приводятся).

В [3] приведена численная методика расчета ЛИМ с коротким ВЭ при питании от источника напряжения. Модель ЛИМ представлена тремя областями, соответствующими краевым и активной зонам реального индуктора (рис.3а). Все зоны разбиваются на отдельные участки, в которых первичные I_1 , вторичные I_2 токи, магнитные свойства индуктора (тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля H_x) и индукция в зазоре B_δ связаны уравнением закона полного тока

$$\delta B_{zi} - \delta B_{zi+1} + t_z \mu_0 H_{xi} = \mu_0 w I_{1i} + \mu_0 I_{2i}. \quad (3)$$

Уравнения (3) дополняются уравнениями электрического состояния для обмотки индуктора

$$\dot{U}_\phi = -\dot{E}_\phi + Z_I \dot{I}_{1i}, \quad (4)$$

и ВЭ

$$\dot{E}_{2ДВi} - \dot{E}_{2ДВi+1} - \dot{E}_{2ТРi} = Z_2 (I_{2i} - I_{2i+1}). \quad (5)$$

Входящие в уравнения (4,5) величины фазных ЭДС E_ϕ обмотки индуктора и трансформаторная ЭДС $E_{2ТР}$ ВЭ определяются очевидным выражением

$$\dot{E} = -j\omega\Phi_i = -j\omega t_z \sum B_{zi}. \quad (6)$$

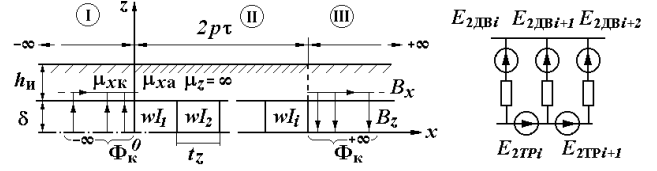


Рис. 3.

ЭДС движения в (5) $E_{2ДВ}$ вычисляются с использованием среднего значения индукции B_c на участке

$$\dot{E}_{2ДВi} = -B_{Ci} a v. \quad (7)$$

Совместное решение уравнений (3-7) позволяет найти значения индукций, вторичных токов на всех участках разбиения, величины первичных токов, а также усилия, действующие на ВЭ, при любом его положении относительно индуктора.

Таким образом, эта методика корректно описывает первичный продольный краевой эффект, магнитный поверхностный эффект в коротком ВЭ моделируется непосредственно только в продольном направлении. Поперечный и толщинный эффекты учитываются опосредованно, коррекцией электропроводности ВЭ и величины немагнитного зазора.

Одновременный учет магнитного поверхностного эффекта в продольном направлении, продольный поперечный (приблизительно) и толщинный эффекты довольно просто реализуется с помощью современных пакетов метода конечных элементов (МКЭ), например, *ELCUT*. Замыкание вторичных токов в пределах короткого ВЭ моделируется его разбиением на ряд участков и соединением их внешней электрической цепью (рис. 4). Соответственно, поперечный краевой эффект учитывается опосредованно, изменением электропроводности материала ВЭ

$$\gamma_\Sigma = k_{non} \gamma. \quad (8)$$

В настоящей работе использовался коэффициент поперечного краевого эффекта для коротких ВЭ, предложенный в [4]

$$k_{non} = 1 - \frac{2b}{\pi a} \cdot th \frac{\pi a}{2b}. \quad (9)$$

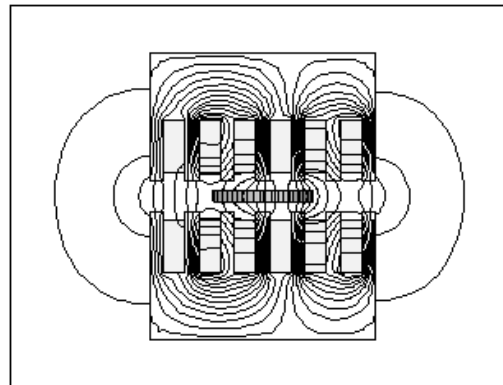


Рис. 4.

Таким образом, во всех перечисленных моделях ЛИМ с коротким ВЭ часть значимых явлений описывают опосредованно и требует экспериментальной оценки.

Таблица 1

Основные технические данные индуктора

Величина	Обозначение	Значение
число фаз	m	3
число полюсов	$2p$	2
полюсное деление	τ	52.5 мм
ширина пакета статора	L	56.0 мм
немагнитный зазор	δ	15.0 мм
световой зазор	δ_c	13.0 мм
линейная нагрузка	A	83.0 кА/м

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

В качестве лабораторной установки авторами использовался электродинамический сепаратор с наклонной плоскостью (рис. 1) и двусторонним трехфазным индуктором (рис. 2). Основные технические данные индукторов приведены в табл. 1.

Питание сепаратора может осуществляться как от лабораторной сети 127/220 В, 50 Гц, так и от преобразователя частоты (0-400 Гц). Для обеспечения поддержания номинальной линейной нагрузки при питании от сети и от преобразователя, предусмотрена возможность изменения схем соединения обмоток индукторов (последовательно или параллельно), а также схем соединения фаз (звезда или треугольник).

Номинальная линейная нагрузка индукторов обеспечивается при питании от сети 50 Гц при последовательном включении обмоток и соединении фаз в звезду. Эта схема наиболее удобна для измерений электрических величин – токов, напряжений мощностей. При питании от преобразователя частоты номинальная линейная нагрузка обеспечивается при параллельном включении обмоток, соединенных в звезду, в диапазоне частот 50-100 Гц, при параллельном соединении двух треугольников - в диапазоне частот 50-200 Гц.

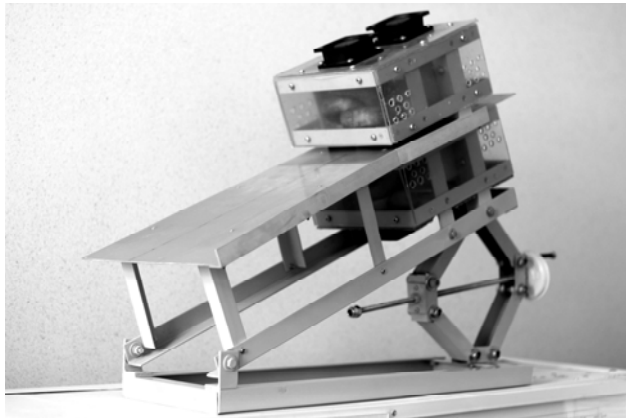


Рис. 5. Внешний вид сепаратора

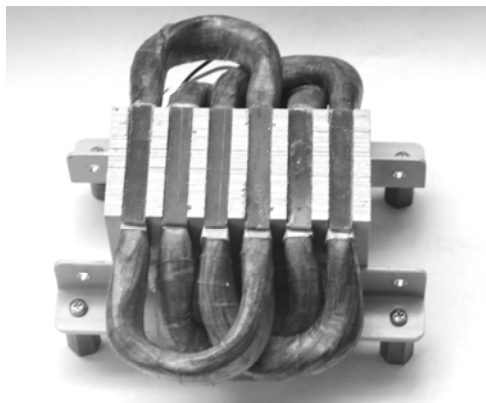


Рис. 6. Индуктор сепаратора

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Электрические величины сепаратора и распределение магнитного поля индуктора определялись при питании сепаратора от сети. в этом случае обмотки индукторов соединялись последовательно в звезду. Такая схема обеспечивала одинаковые токи в фазах верхнего и нижнего индуктора, позволяла непосредственно измерять фазные напряжения и мощности. Результаты этих измерений приведены в табл. 2. В этой же таблице приведены расчетные данные, полученные по методике [3]. Видно, что расчет дает весьма близкие к опытным значения.

Распределение магнитного поля определялось с помощью плоской измерительной катушки, ширина которой была меньше ширины зуба магнитопровода. Измерения ЭДС проводилось над серединами каждого зуба и паза. Сопоставление экспериментально полученного и расчетного распределений индукции приведено на рис.7.

Таблица 2

Сопоставление экспериментальных (числитель) и расчетных (знаменатель) данных

Фаза	$U_{\phi}, \text{В}$	$I_{\phi}, \text{А}$	$P_{\phi}, \text{Вт}$
A	133 / 134	1.63 / 1.69	98.8 / 114.4
B	133 / 136	1.78 / 1.82	2.0 / 5.0
C	118 / 116	1.22 / 1.23	25.0 / 30.4

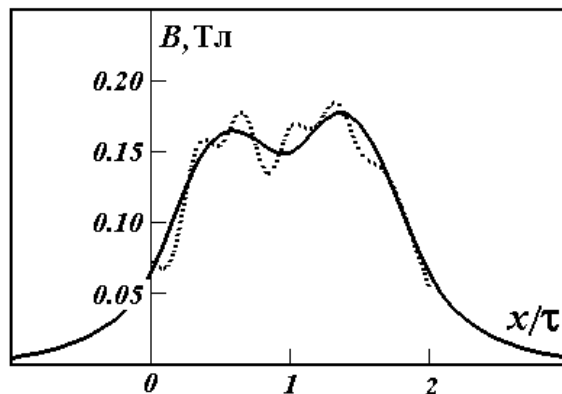


Рис. 7. Распределение магнитного поля индуктора: --- эксперимент; ---- расчет ($f=50\text{Гц}$)

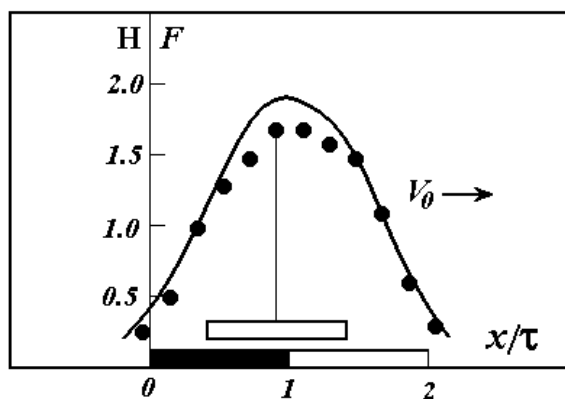


Рис. 8. Распределение усилия вдоль длины индуктора:
• - эксперимент; ---- расчет ($f=50$ Гц)

Значительная неравномерность распределения магнитного поля вдоль индуктора, очевидно должна приводить к изменению усилия, действующего на короткий ВЭ, в зависимости от его положения относительно индуктора. Так, на рис. 8 приведены экспериментальные и расчетные зависимости усилия для алюминиевой пластины длиной $b = 50$ мм, шириной $a = 50$ мм, толщиной $d = 5$ мм. Можно отметить хорошее качественное совпадение этих зависимостей.

Вторая серия экспериментов была проведена при питании сепаратора от преобразователя частоты. Увеличение частоты магнитного поля индуктора позволяет сепарировать смеси малой крупности. Так на рис. 9 приведены сепарационные характеристики для частиц крупностью 5 мм, т.е. при соотношении $b/\tau = 0.1$. Видно, что увеличение частоты с 50 до 200 Гц позволяет резко увеличить содержание полезного продукта в концентрате.

При поведении экспериментов на повышенной частоте обмотки индукторов включались параллельно, фазы обмоток соединялись треугольником. Такая схема соединений позволяла достоверно измерять только линейные токи. Преобразователь частоты настраивался на закон регулирования $U/f = \text{const}$, что обеспечивало поддержание неизменной линейной нагрузки индукторов при изменении частоты.

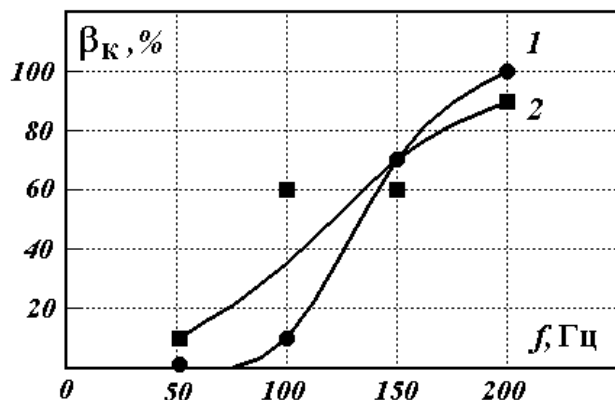


Рис. 9. Степень извлечения металла:
1 – алюминия из медно-алюминевых смесей;
2 – меди из медно-латунных смесей

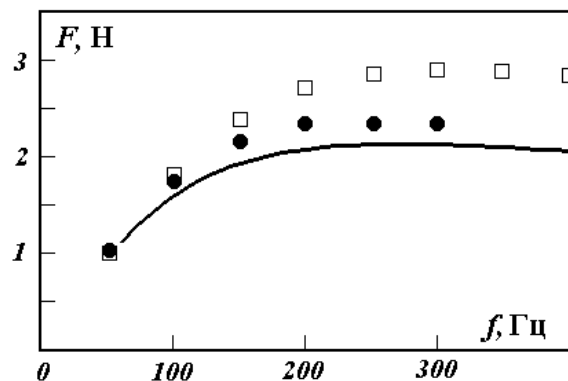


Рис. 10. Зависимость усилия, действующего на пробную пластину от частоты:
• - эксперимент; □ - расчет по МКЭ; ---- расчет по (2)

Эксперименты состояли в измерении усилий, действующих на алюминиевую пластину длиной $b = 50$ мм, шириной $a = 50$ мм, толщиной $d = 5$ мм. Такой ВЭ располагался в середине индуктора во всех опытах. Результаты этих экспериментов приведены на рис. 10. На том же рисунке нанесены расчетные данные, полученные по (2) и с помощью программы *ELCUT*. Обращает на себя внимание, увеличивающееся расхождение результатов, полученных методом конечных элементов, в области повышенных частот. Это расхождение можно объяснить следующим образом. Увеличение частоты с 50 до 300 Гц приводит к увеличению добротности машины с 1 до 6. В тоже время поправочный коэффициент (9), используемый в расчетах, получен в допущении добротности машины равной нулю. В последнем случае применение поправочного коэффициента поперечного краевого эффекта по (9) становится некорректным. Как показано в [5], в общем случае, этот коэффициент имеет комплексное значение. Однако *ELCUT* не допускает применения комплексной проводимости материалов

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коняев А.Ю. Влияние поверхностного эффекта на характеристики электродинамических сепараторов с бегущим магнитным полем. А.Ю. Коняев, И.А. Коняев, С.Л. Назаров // *Электричество*. – 2013 - N11. - С. 26-30.
2. Коняев А.Ю. Исследование характеристик электродинамических сепараторов на основе двумерной модели / А.Ю. Коняев, С.Л. Назаров. // *Электротехника*. – 1998. - N5. - С. 52-58.
3. Коняев А.Ю. Особенности электродинамических сепараторов на основе линейных индукторов с разбегающимися магнитными полями / А.Ю. Коняев, С.Л. Назаров // *Электротехника*. – 2013. - N3. - С. 62-66.
4. Коняев А.Ю. Оценка характеристик линейных индукционных машин при ограничении размеров вторичного элемента / А.Ю. Коняев, И.А. Коняев, Н.Е. Маркин, С.Л. Назаров // *Электричество*. – 2010. - №4. - С. 32-36.
5. Вольдек А.И. Индукционные магнетогидродинамические машины с жидкометаллическим рабочим телом / А.И. Вольдек. - Л.: Энергия, 1970. - 272 с.